

すみ肉溶接継手の腐食疲労亀裂発生・進展挙動

INITIATION AND PROPAGATION BEHAVIOR OF CORROSION FATIGUE CRACKS IN FILLET WELDED JOINT

* 坂野昌弘 · ** 新井弘 · *** 西村俊夫

By Masahiro SAKANO, Hiroshi ARAI and Toshio NISHIMURA

Long life corrosion fatigue tests were carried out using web gusset joints made of SM41 and SM58 steels in order to investigate initiation and propagation behavior of corrosion fatigue cracks in fillet welded joint. Fatigue cracks initiated from the bottom of corrosion pits formed like a groove along the stress-concentrated portion of the weld toe. The relationship between corrosion pit growth rate and stress intensity factor range (ΔK) calculated assuming the pit to be a crack could be expressed by extension of corrosion fatigue crack growth rate vs. ΔK line to the lower ΔK region. Finally it was verified that corrosion fatigue life of fillet welded joint could be accurately estimated even in the lower stress region by the fracture mechanics concept taking account of the process of corrosion pit development.

1. はじめに

現在、我が国の鋼橋に適用される設計基準^{1,2)}では腐食疲労に対する配慮がほとんどなされていない。しかし、腐食環境下では鋼材の疲労強度が大幅に低下することが知られており³⁾、海上や海岸部など厳しい腐食作用を受けるおそれがある場合には腐食疲労による寿命低下について十分な認識をもって対処する必要がある。

溶接橋梁では疲労亀裂はすみ肉溶接部に発生する場合が多いことから、すみ肉溶接継手の疲労特性を把握することが重要となる。すみ肉溶接継手を対象とした腐食疲労試験はいくつか行われているが^{4~6)}、実際に橋梁部材に生じる応力の大きさや耐用年数を考慮した場合に重要となる疲労限以下の低応力・長寿命域についてはほとんどデータが得られていない。また、腐食疲労特性を特徴づける腐食ピットの形成とそれらを起点とした疲労亀裂の発生・進展挙動についてもほとんど検討されていない。

本研究では、鋼橋における疲労亀裂発生位置の大半を占める⁷⁾すみ肉回し溶接部を対象として低応力・長寿命域を中心に空気中および塩水腐食疲労試験を行い、腐食環境下における疲労強度の低下性状および疲労亀裂の発生・進展挙動について検討した。さらに、それらの結果に基づき、腐食ピットの成長過程を考慮して破壊力学の手法を用いた疲労寿命予測を行った。

* 工博 群馬大学助手 工学部建設工学科 (〒376 群馬県桐生市天神町1-5-1)

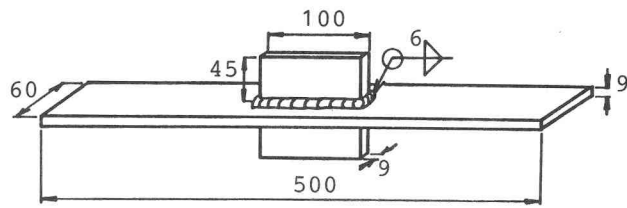
** 工修 横河橋梁製作所研究所 (〒260 千葉県千葉市新港88)

*** 工博 足利工業大学教授 工学部土木工学科 (〒326 栃木県足利市大前町268)

2. 疲労試験

(1) 試験体

疲労試験には回し溶接部をもつウェブガセットタイプの継手試験体を用いた。図－1に試験体の形状と寸法を示す。このタイプの継手は溶接止端形状による局所的な応力集中に加えて継手形状による3次元的な応力集中が生じるため、鋼鉄道橋設計標準¹⁾



図－1 試験体の形状と寸法（寸法の単位：mm）

では最も疲労強度の低い継手区分に分類されている。試験体の製作にはSM41B とSM58Q を用い、溶接棒はそれぞれD5016とD5816を用いた。鋼材と溶接金属の機械的性質と化学成分（ミルシート値）を表－1に示す。溶接のばらつきを少なくするため、全ての試験体を一人の溶接工が施工した。溶接条件は、電流：150～160 A、電圧：22～23V、溶接速度：8cm/minである。なお、実橋ではこれらの鋼材は塗装されて使用されているが、ここでは塗膜が劣化した状態（われ、はがれなど）を想定しており、試験体に塗装は施していない。

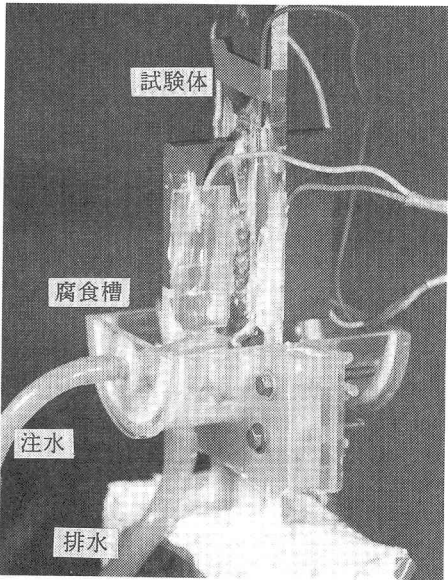
表－1 試験体材料の機械的性質と化学成分

材料	機械的性質			化学成分（％）					
	Y. P. (MPa)	T. S. (MPa)	EL. (%)	C x100	Si x100	Mn x100	P x1000	S x1000	Mo x100
SM41B	304	451	32	12	23	160	20	6	
SM58Q	608	706	25	13	26	141	21	4	
D5016	490	565	31	9	63	90	19	5	
D5816	550	646	28	7	63	110	17	6	24

(2) 腐食疲労試験方法

疲労試験は電気油圧式疲労試験機を用い、最小応力を9.8MPaとした引張り片振り荷重により行った。試験環境は室内空气中、および25℃3％食塩水(pH=7.1～7.2)を溶接止端部にそそぎかけた状態（流量：約1ℓ/min）の2種類とした。塩分の影響は湿気とともに鋼橋の腐食原因の上位に挙げられている^{2),3)}。腐食疲労試験においても、蒸留水やpH=4のH₂SO₄水に比べて塩水がかかる場合の疲労強度が低くなることが著者ら³⁾によって確認されている。また、腐食疲労の場合には、乾湿繰返しよりも連続湿潤状態の方が厳しい環境となることが西村・皆田⁴⁾により報告されている。腐食槽はアクリル樹脂を用いて作製し、図－2に示すように試験体に装着した。

腐食疲労試験の荷重繰返し速度は前報³⁾と同様に橋梁部材に生じる活荷重応力の繰返しを想定して1.7Hzとした。空气中疲労試験では繰返し速度の影響がないことから試験の効率化を考慮して15Hzで行った。



図－2 腐食疲労試験状況

(3) 疲労亀裂の検出

腐食環境下では、ピーチマークなどにより亀裂形状を破面に残すことは容易なことではない。本研究では溶接止端部における亀裂発生を検知および亀裂進展の追跡のために交流ポテンシャル法を用いた^{10,11)}。電流供給リード線およびセンシングリード線の溶着位置を図-3に示す。なお、リード線溶着位置から亀裂が生じた例はない。

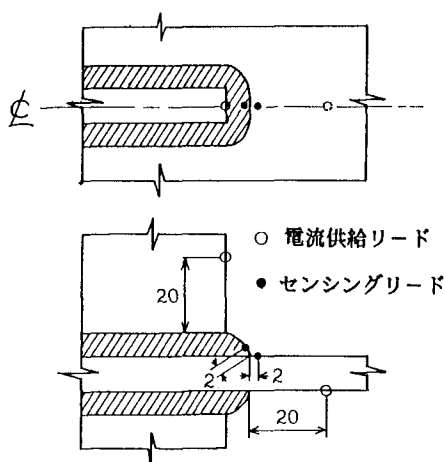


図-3 交流ポテンシャル法リード線取付位置

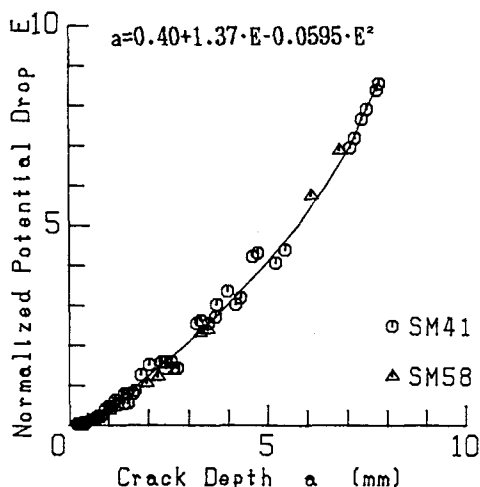


図-4 電位差変化と亀裂深さの関係

亀裂深さと電位差変化の関係は空気中でのピーチマーク試験により求めた。図-4に、そのキャリブレーションカーブを示す。縦軸は亀裂深さが7mmになったときの電位差で無次元化したものである。図に示すように亀裂深さは電位差変化の2次式として表わすことができる。この方法では深さ0.3~0.5mmの微小な亀裂発生を検知することができた。ここでは、その程度の深さの亀裂を検出したときの応力繰返し数を亀裂発生寿命 N_c と定義した。

3. 応力拡大係数

溶接継手に生じる亀裂に対して応力拡大係数が得られれば、破壊力学の手法を用いて疲労亀裂の発生・進展挙動を検討することができる。溶接止端部に発生した半楕円形表面亀裂の応力拡大係数範囲 ΔK は式(1)によって表わすことができる。

$$\Delta K = S_r \sqrt{\pi a} \cdot F_s \cdot F_g \quad (1)$$

ここで、 S_r は公称応力範囲、 a は亀裂深さである。 F_s は亀裂形状や断面の寸法に対する、また F_g は継手形状により生じる応力集中に対する補正係数である。これらのうち、 F_s は式(2)により求められる¹²⁾。

$$F_s = 1/E(k) \cdot (M_1 + M_2 \cdot \lambda^2 + M_3 \cdot \lambda^4) \cdot \sqrt{\sec(\pi b/2W) \cdot \sqrt{\lambda}} \quad (2)$$

$$E(k) = \sqrt{1 + 1.464(a/b)^{1.65}}$$

$$M_1 = 1.13 - 0.09(a/b)$$

$$M_2 = -0.54 + 0.89/(0.2 + a/b)$$

$$M_3 = 0.5 - 1/(0.65 + a/b) + 14(1 - a/b)^{2.4}$$

ここに、 b は亀裂表面長さの1/2、 W は板幅の1/2、 $\lambda = a/T$ (T は板厚)である。

図-5に空気中のピーチマーク試験から得られた亀裂形状比 a/b と a/T の関係を示す。 a/b は亀裂の進展にと

もなつて0.1以下から0.7程度にまで増加している。亀裂深さが板厚の半分以上ではa/bの増加の割合が鈍くなつてゐるが、ここでは単純化のために図-5中に示す1本の直線でa/bとa/Tの関係を表わすこととし、疲労寿命予測では空气中、腐食環境下ともにこの関係を用いた。

Fgについては亀裂がない場合の応力分布から重ね合わせの原理により求めることができる¹⁹⁾。竹名ら²⁰⁾は亀裂がないときの応力分布を比較的粗い要素分割の3次元FEMと局所的な2次元FEMの組み合わせにより求めている。ここでは亀裂のないときの応力分布を3次元FEM¹⁹⁾のみにより計算した。そのときに仮定した止端半径ρと止端角θは、亀裂発生位置付近で測定したものの平均値(ρ=0.5mm, θ=60°)を用いている。図-6に測定されたρとθの分布を示す。両鋼種の間に止端形状の違いは見られない。図-7は解析対象と要素分割である。試験体の対称性から全体の1/8に対して解析を行った。止端部の最小要素寸法は板厚方向に0.01mmとした。以上のようにして求められたFgの板厚方向の変化を図-8に示す。6章の疲労寿命予測で仮定する初期亀裂深さ15μmではFgは約3.8となる。

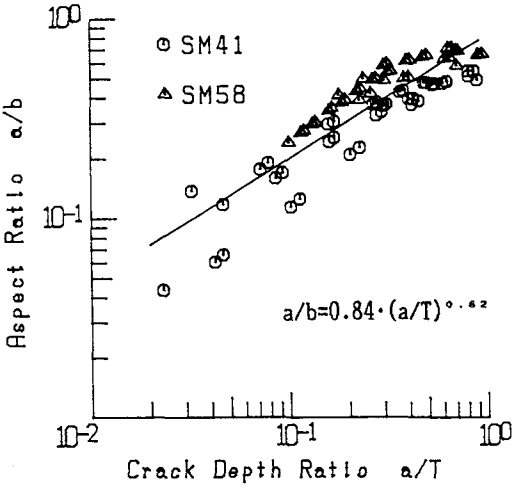


図-5 亀裂形状の変化

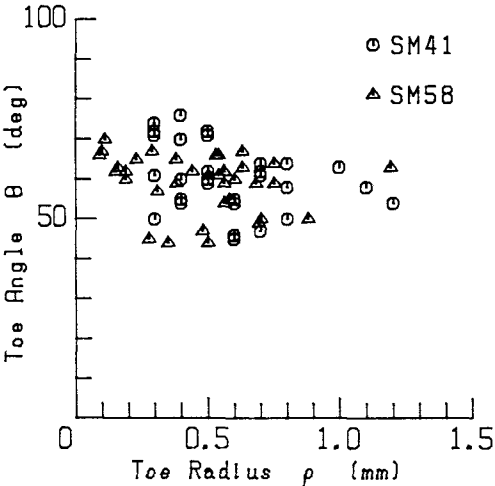


図-6 止端半径ρと止端角θ

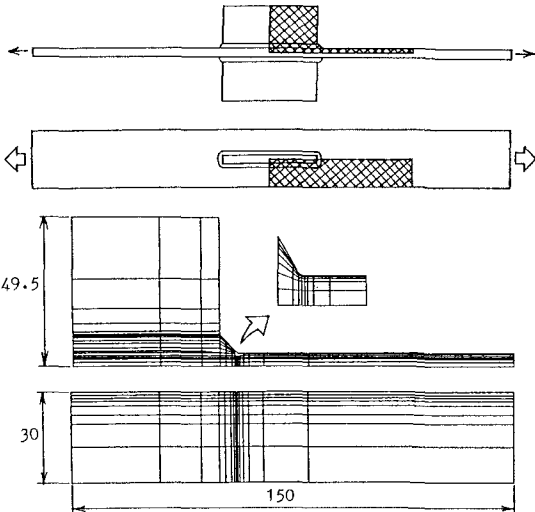


図-7 3次元有限要素モデル

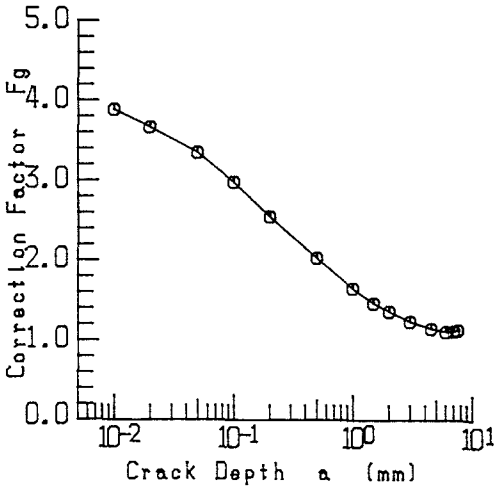


図-8 補正係数Fgの変化

4. 試験体の疲労寿命

図-9と図-10に各試験体の応力範囲 S_r と亀裂発生寿命 N_c の関係および S_r と破断寿命 N_f の関係を示す。各図中の直線は、亀裂が発生した試験体あるいは破断した試験体について最小2乗法により求めた回帰直線である。表-2に各回帰直線の定数 m と C の値を示す。SM58では、両環境下および N_c 、 N_f の全てについて m は3.0~3.3でほとんど変わらない。SM41では、 m は空气中疲労で4以上であるが腐食疲労ではやはり3程度の値となっている。

図-9に示すとおり、空气中では S_r が100MPa以上の試験体は全て100万回までに亀裂が発生しているが、 $S_r < 90$ MPaでは両鋼種とも500万回以上の応力繰返しを受けても亀裂発生が認められず疲労限が存在する。腐食環境下では空气中の疲労限以下でも亀裂が生じており、疲労限の半分程度まで $S_r \sim N_c$ 関係は直線的に低下し続けることが確認された。

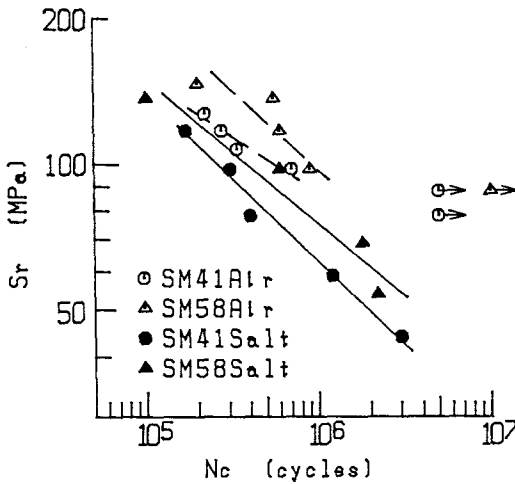


図-9 各試験体の $S_r \sim N_c$ 関係

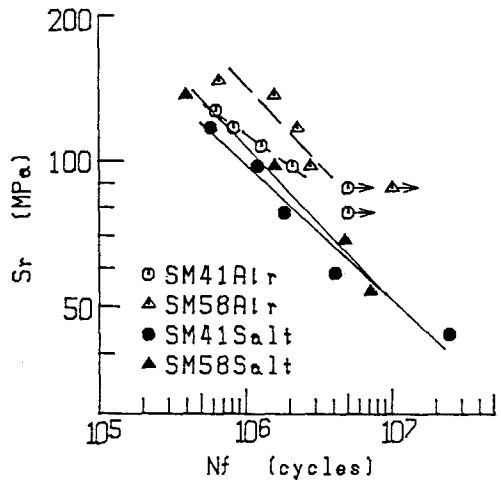


図-10 各試験体の $S_r \sim N_f$ 関係

表-2 各 $S \sim N$ 回帰直線の定数

		空气中疲労		腐食疲労	
		m	C	m	C
N_c	SM41	4.3	2.0×10^{14}	2.9	1.6×10^{11}
	SM58	3.0	1.1×10^{12}	3.3	1.9×10^{12}
N_f	SM41	4.7	3.8×10^{15}	3.6	1.3×10^{13}
	SM58	3.1	5.6×10^{12}	3.1	2.4×10^{12}

注) m 、 C は、 $S_r^m \cdot N = C$ の定数

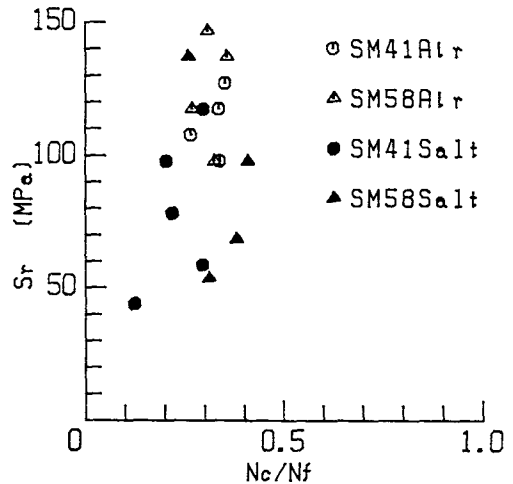


図-11 各試験体の $S_r \sim N_c/N_f$ 関係

空気中では、Nc、Nfともに、疲労限以上の高応力域でSM58の方がSM41に比べて長寿命であるが、疲労限付近ではほとんど差がないといつてよい。腐食環境下では、Ncに関してSM58が長寿命となる場合があるが、Nfに関しては鋼種による違いはほとんどみられず、Sr～Nf関係は1000万回程度まで両対数紙上で傾きが約 $-1/3$ の一本の直線で表わすことができる。

図-11にSrとNc/Nfの関係を示す。溶接止端に沿って並行に発生した複数の亀裂の相互干渉により極端に亀裂進展寿命が長くなったデータ (Sr=45MPa) を除いてNc/Nfは0.2～0.4程度となっており、応力範囲による違いは見られない。このように腐食環境下では、低応力域においても疲労亀裂は応力繰返しの早い時期に発生し、疲労寿命の大半は亀裂の進展過程に費やされる。

5. 腐食疲労亀裂の発生進展挙動

(1) 疲労亀裂の発生

空気中では図-12に示すとおり疲労亀裂はすみ肉回し溶接部止端から発生している。図-13は亀裂発生位置付近の破面の電子顕微鏡写真である。各試験体の亀裂発生位置には図-13で見られるような表面に接し比較的平坦なファセット状の部分が観察された。このような破面は小林ら^{15,16)}あるいはTanakaとAkiniwa¹⁷⁾によっても観察されており、すべり面分離により応力繰返しの極めて初期に生じるいわゆる第1段階の亀裂面であると考えられている。図-14にこれらのファセット状破面の深さと応力範囲の関係を示す。ファセット状破面の深さは10～30 μm 程度で、鋼種および応力範囲によらずおおよそ一定とみなすことができる。本研究ではこのようなファセット状破面を寿命予測を行う際の初期亀裂と仮定した。

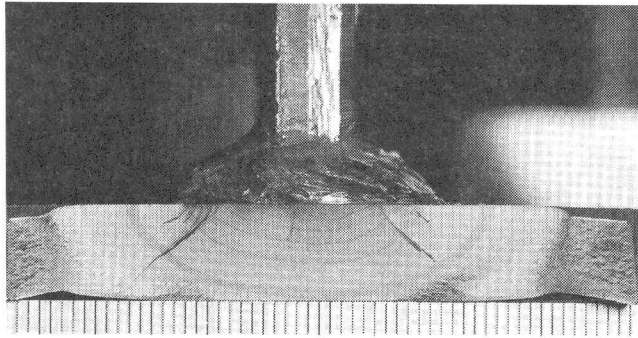


図-12 空気中疲労破面 (SM41, Sr=98MPa)



図-13 空気中疲労破面の電子顕微鏡写真 (SM58, Sr=98MPa)

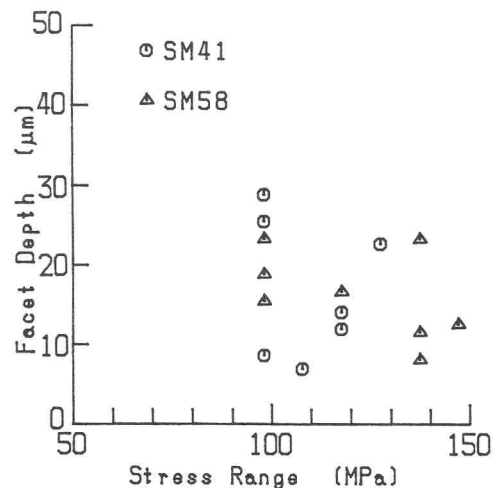
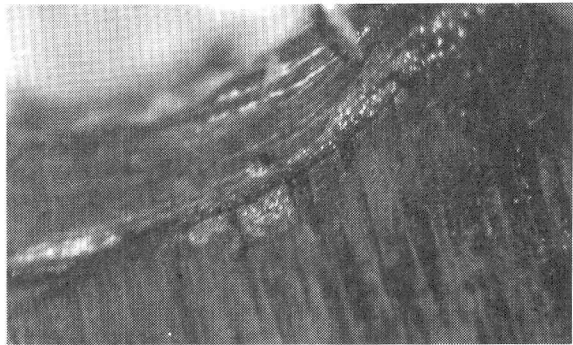
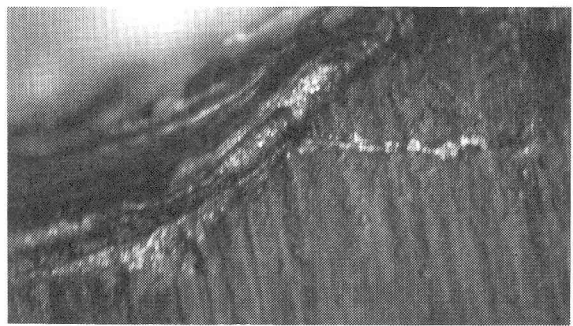
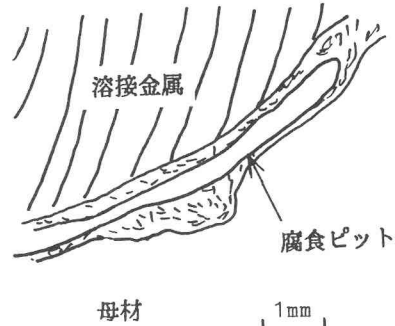


図-14 ファセット状破面の深さと応力範囲の関係

腐食疲労ではすみ肉回し溶接部の止端に沿って溝状にピットが形成され（図-15(a) 参照）、応力繰返し数の増大とともにその底から疲労亀裂が発生し応力方向と直角方向に進展している（図-15(b)参照）。このようなピットは溶接止端の応力集中部以外では見られない。したがって、腐食ピットの発生と成長には繰返し応力の影響が大きいことがわかる。



(a) 応力繰返し数=40万回



(b) 応力繰返し数=115万回

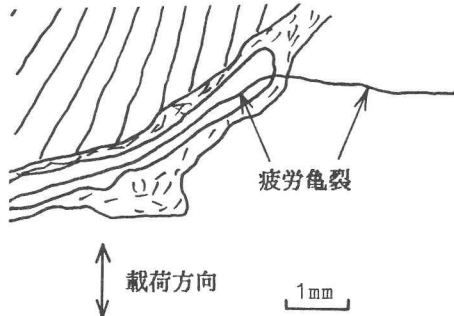


図-15 腐食ピットと腐食疲労亀裂 (SM41, $S_r=98\text{MPa}$)

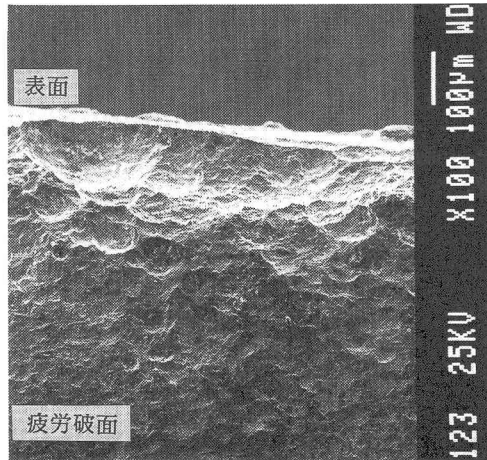


図-16 腐食疲労破面に残された腐食ピット
(SM58, $S_r=98\text{MPa}$)

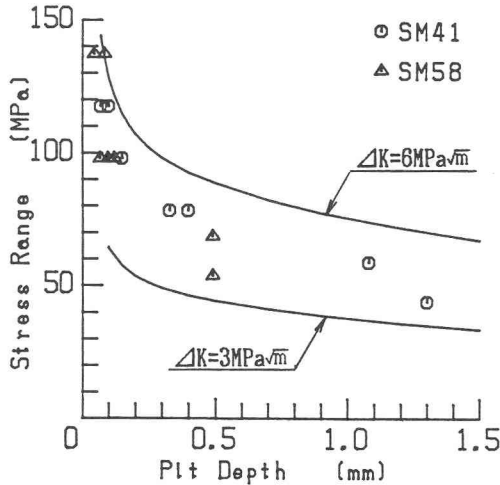


図-17 腐食ピット深さと応力範囲の関係

図-16は、腐食疲労破面に残された腐食ピットの顕微鏡写真である。試験体表面と腐食ピットの境界線が比較的是っきりと残っているのとは対照的に、腐食ピット底部と疲労破面の境界は明瞭ではなく、腐食ピットの成長過程から亀裂の進展過程へと徐々に遷移していったことが推察できる。疲労破面から読取ったピット深さと応力範囲 S_r の関係を図-17に示す。 S_r が小さいほどピットの深さは大きくなっている。このようなピットを亀裂と仮定し応力拡大係数範囲を求めると、図-17に示すように両鋼種ともにほぼ $\Delta K=3\sim6\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ の範囲に含まれる。これらの深さまでピットは成長し、それ以降は亀裂が発生、進展することから、この領域が腐食疲労によるピットの成長過程と亀裂の進展過程の境界域であると考えられる。

(2) 疲労亀裂の進展

図-18に、それぞれの鋼種および環境下の亀裂進展速度 da/dN と応力拡大係数範囲 ΔK の関係を示す。データのばらつきがやや大きいが、腐食環境下の da/dN は空気中のものに比べて全体的に2倍程度大きくなっている。また、鋼種による違いはほとんどみられない。図中の2本の実線は、Okumuraら¹⁹⁾により構造用鋼材について得られている非超過確率が50%および84.1%の関係であり、それぞれ式(3)および式(4)で表わされる。

$$da/dN = 5.0 \times 10^{-12} \cdot \Delta K^3 \quad (3)$$

$$da/dN = 1.0 \times 10^{-11} \cdot \Delta K^3 \quad (4)$$

これらの直線は、本研究で得られた空気中および腐食環境下の $da/dN \sim \Delta K$ 関係のほぼ上限となっている。また、図中の破線は山田・左高⁵⁾がSM58について食塩水中で求めた $da/dN \sim \Delta K$ 関係を表わす。本研究で測定されたデータの大半はそれらよりも低い ΔK 域のものである。

図-18中には、図-17に示した深さ0.4mm以上の腐食ピットについて交流ポテンシャルにより求めた腐食ピットの成長速度も合わせて示してある。図に示すように腐食ピット成長速度と ΔK の関係は腐食疲労亀裂進展速度と ΔK の関係のほぼ延長上に分布している。

6. 疲労寿命予測

4章で述べたようにすみ肉溶接継手の疲労寿命は疲労亀裂の進展過程とみなすことができることから、ここでは破壊力学の手法¹⁹⁾を適用して疲労寿命予測を試みた。

空気中疲労寿命の予測には、図-18に示したOkumuraらの非超過確率50%の $da/dN \sim \Delta K$ 関係(式(3))、および溶接継手について得られている $\Delta K_{th}=2.5\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ ²⁰⁾を用いた。初期亀裂深さは、図-14に示したファセット状破面深さの平均値 $15\mu\text{m}$ を仮定した。最終亀裂深さは、 N_c については0.4mm、 N_f については板厚の80%に仮定した。 N_c, N_f の実験値と予測曲線を図-19に示す。寿命予測曲線は疲労限を含めて実験値をよく表わしており、初期亀裂の仮定が妥当なものであることが確認された。

腐食環境下では、空気中の疲労限以下の低応力域においてもピットの成長として疲労破壊が進行し、それを起点として疲労亀裂が発生、進展することから $\Delta K_{th}=0$ とみなし、腐食ピットの成長速度を含めて図-18のOkumuraらの非超過確率84.1%の $da/dN \sim \Delta K$ 関係(式(4))を用いた。初期亀裂深さについては、図-13

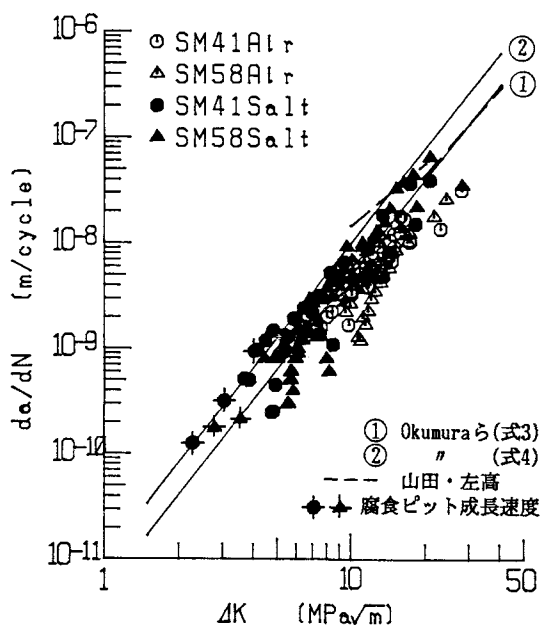


図-18 亀裂進展速度と応力拡大係数範囲の関係

に示したファセット状破面が応力繰返しの極めて初期に生じることからこれを起点として腐食ピットが成長を開始すると考え、空気中の寿命予測と同様、 $15\mu\text{m}$ に仮定した。最終亀裂深さについても空気中の場合と同様に仮定した。 N_c と N_f の実験値と予測曲線を図-20に示す。腐食疲労寿命についても空気中の場合と同様に予測曲線は実験値を安全側から良く表わしている。以上により、腐食ピットの成長過程を含めて破壊力学の手法を適用することにより、すみ肉溶接継手の腐食疲労寿命を低応力域まで予測できることが示された。

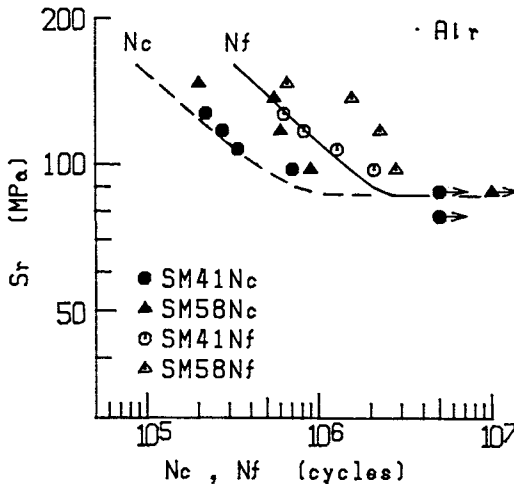


図-19 空気中疲労寿命の予測

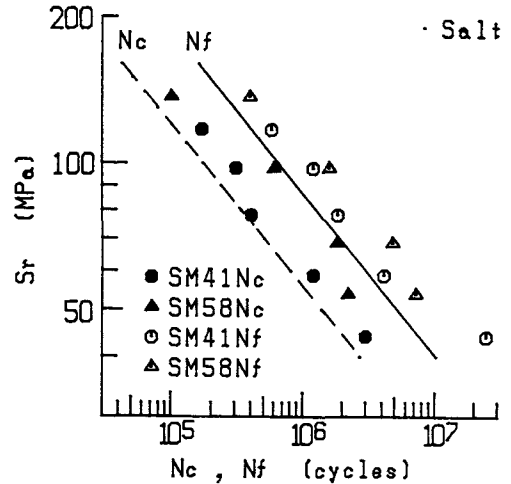


図-20 腐食疲労寿命の予測

7. おわりに

ウェブガセットタイプのすみ肉溶接継手試験体を用いて空気中疲労限の半分程度の低応力範囲および繰返し数 10^7 回に及ぶ長寿命腐食疲労試験を行い、腐食環境下における疲労強度の低下性状および疲労亀裂の発生、進展挙動について検討した。得られた主な結果を以下に示す。

- (1) 空気中疲労ではSM41, SM58ともに $S_r < 90\text{MPa}$ で亀裂が発生せず疲労限が存在する。腐食環境下では両鋼種ともに空気中疲労限の半分程度の低応力域でも亀裂が発生し進展した。腐食環境下の $S_r \sim N_f$ 関係には鋼種による違いはほとんどみられず、両対数紙上で 10^7 回程度まで傾きが約 $-1/3$ の直線で表わすことができる。
- (2) 空気中疲労破面では亀裂発生位置において表面に接し比較的平坦なファセット状の部分が観察された。それらの深さは鋼種および応力範囲によらず $10 \sim 30\mu\text{m}$ 程度であった。腐食環境下では、疲労亀裂は溶接止端の応力集中部に沿って溝状に形成された腐食ピットの底から発生した。
- (3) 腐食環境下の亀裂進展速度 da/dN は空気中のものに比べて全体的に2倍程度大きくなっており、鋼種による違いはほとんどみられなかった。また、腐食ピットの成長速度と ΔK の関係は腐食疲労亀裂の $da/dN \sim \Delta K$ 関係の低 ΔK 側への延長線上に分布した。
- (4) 空気中疲労限以下の低応力域におけるすみ肉溶接継手の腐食疲労寿命は、ファセット状破面を初期欠陥としてそこから腐食ピットが成長し始めると仮定し、腐食ピットの成長過程を含めて破壊力学の手法を適用することにより予測することができる。

謝辞：本研究を行うにあたり、群馬大学辻幸和教授、東京工業大学三木千寿助教授には貴重な御助言をいただき、群馬大学池田正志技官には実験に御協力いただいた。また、本研究の一部は文部省科学研究費補助金（奨励研究(A)、課題番号：01750428）によるものである。各位に対し深甚なる感謝の意を表する次第であ

る。なお、本研究中の応力解析には群馬大学計算センターを利用した。

参考文献

- 1) 土木学会：国鉄建造物設計標準解説（鋼鉄道橋），1983.
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，1970.
- 3) 坂野昌弘・横尾正幸・新井弘・西村俊夫：腐食環境下における鋼切欠き部材の疲れき裂発生寿命，構造工学論文集，Vol. 34A，pp. 469-481，1988.
- 4) 西村昭・皆田理：腐食環境下のガセット継手の表面形状と疲労強度，土木学会論文集，第380号／I-7，pp. 401-409，1987.
- 5) 山田健太郎・左高茂樹：リブ十字隅肉溶接継手の塩水中での疲労試験と寿命解析，土木学会論文集，第398号／I-10，pp. 377-384，1988.
- 6) 岩崎紀夫：海洋構造物用鋼材とその溶接継手の海水腐食疲労強度に関する研究，大阪大学工学部学位論文，1987.
- 7) 三木千寿・坂野昌弘・館石和雄・福岡良典：鋼橋の疲労損傷事例のデータベースの構築とその分析，土木学会論文集，第392号／I-9，pp. 403-410，1988.
- 8) 日本鋼構造協会技術委員会耐用性調査小委員会：構造物の耐用性調査報告・鉄道橋編，JSSC，Vol. 5, No. 39，pp. 1~30，1969.
- 9) 日本鋼構造協会技術委員会耐用性調査小委員会：構造物の耐用性調査報告・道路橋編，JSSC，Vol. 8, No. 84，pp. 6~26，1972.
- 10) 田中啓介・秋庭義明・藤田成雄：交流電位差法による切欠き材での疲労亀裂伝ぱの計測，材料，第36巻，第401号，pp. 177-183，1987.
- 11) Smith, I.F.C. and Smith, R.A. : Fatigue Crack Growth in a Fillet Welded Joint, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 18, No. 4, pp. 861-869, 1983.
- 12) The Society of Materials Science, Japan: Stress Intensity Factors Handbook, Vol. 2, pp. 712-722, Pergamon Press, 1987.
- 13) 竹名興英・川上博道・伊藤文夫・三木千寿：ウェブガセット溶接継手の応力解析と疲労寿命予測，土木学会論文集，第392号／I-9，pp. 345-350，1988.
- 14) Wilson, E.L. : A Static Analysis Program for Three Dimensional Solid Structures, Denver Mining Research Center Report, U.S. Department of the Interior Bureau of Mines, 1971.
- 15) 小林英男・中沢一・小峰厚友：第一段階の疲れ亀裂進展過程のフラクトグラフィ的検討，日本機械学会論文集（第1部），41巻，341号，pp. 9-21，1975.
- 16) 小林英男・川田幸男・中沢一：耐久限度に関連した第一段階き裂のフラクトグラフィ的研究，材料，第25巻，第276号，pp. 881-887，1976.
- 17) Tanaka, K. and Akiwawa, Y. : Resistance-Curve Method for Predicting Propagation Threshold of Short Fatigue Cracks at Notches, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 30, No. 6, pp. 863-876, 1988.
- 18) Okumura, T., Nishimura, T., Miki, C., and Hasegawa, K. : Fatigue Crack Growth Rates in Structural Steels, Proc. of JSCE, No. 322, pp. 175-178, 1982.
- 19) 岡村弘之：線形破壊力学入門，培風館，1976.
- 20) 金属材料技術研究所：疲れデータシート，No. 21(1980)，No. 31(1982)

(1989年10月2日受付)